

УДК 621.793

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ АКТИВАЦИЕЙ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ

*д-р техн. наук, проф. Н.В. СПИРИДОНОВ, И.О. СОКОРОВ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Исследуются газотермические покрытия, в частности, повышение их прочности активацией контактной зоны. Показано, что на прочность сцепления оказывает влияние энергетическое состояние поверхности. Наклеп поверхности при дробеструйной обработке увеличивает число активных центров схватывания, но до определенного значения, – возникновение перенаклепа снижает количество активных центров. Интервал времени между операцией подготовки поверхности и напылением необходимо сводить к минимуму, так как образующиеся окисные пленки на подготовленной поверхности препятствуют схватыванию частиц с основой, что снижает прочность сцепления. При напылении покрытий необходимо обеспечивать равномерное заполнение углублений. Анализируя результаты экспериментальных исследований, следует отметить, что на прочность сцепления также существенно влияет шероховатость поверхности.*

**Введение.** Предварительная обработка поверхности основы является важным фактором для обеспечения прочного сцепления напыленного слоя с материалом основы. Необходимое условие для этого – подготовка поверхности основного материала путем удаления загрязнений и активации поверхности основы.

К основным технологическим приемам активации относятся: повышение шероховатости поверхности; деформирование поверхности основы для создания напряженного состояния; предварительный нагрев изделия.

Существенное влияние на взаимодействие материалов при газотермическом напылении оказывает шероховатость основы. При подготовке поверхности основы для газотермического напыления необходимо учитывать физико-механические свойства поверхности и условия напыления. Так, при напылении частиц с низкой скоростью увеличение шероховатости ведет к росту прочности их с основой и увеличению коэффициента напыления. Достигнув максимального значения, прочность сцепления начинает уменьшаться.

При напылении высокоскоростных частиц увеличение высоты микронеровностей поверхности основы их взаимодействие в зоне контакта изменяет незначительно.

С увеличением шероховатости наблюдаются закономерные явления [1]:

- 1) уменьшается удельная площадь поверхности основы;
- 2) уменьшается концентрация микровыступов;
- 3) растет пластическая деформация вершин микровыступов при напылении;
- 4) ухудшаются условия взаимодействия во впадинах;
- 5) при микронеровностях, соизмеримых с размерами напыляемых частиц и больших, роль микровыступов в образовании связи невелика.

Наиболее сильно влияние шероховатости поверхности основы на образование прочного соединения при небольшой пластической деформации основы.

Таким образом, при подготовке поверхности основы для газотермического напыления с целью получения прочного соединения основы с покрытием, необходимо учитывать перечисленные закономерности. Прочность сцепления покрытий достигает максимальных значений при  $R_z/d = 0,75$ , где  $d$  – диаметр напыляемой частицы. Наиболее высокая прочность сцепления отмечена при напылении порошком фракции 80...100 мкм [2].

**Основная часть.** Как было отмечено, наклеп поверхностного слоя основы оказывает большое влияние на адгезию частиц при газотермическом напылении. Наклеп материала связан с увеличением в нем плотности структурных дефектов. Это приводит к повышению внутренней энергии основы и, следовательно, к уменьшению энергии активации реакции взаимодействия, а это увеличивает прочность образующихся связей.

В материалах с небольшой плотностью дислокаций предварительное увеличение пластической деформации приводит к увеличению числа дислокаций и, в конечном счете, к росту числа активных центров взаимодействия. На этом этапе растет прочность сцепления покрытия с основой. Но дальнейшее повышение плотности дислокаций может привести к уменьшению числа активных центров, а, следовательно, и уменьшению прочности сцепления напыленного покрытия с основой. Это объясняется тем, что движение дислокаций при приложении такого же давления со стороны напыляемой частицы будет тор-

мозиться предварительно созданными дефектами структуры, и в результате этого количество дислокаций, выходящих на контактную поверхность, уменьшится.

Плотность дислокаций в материале основы, влияющая на количество активных центров, зависит от физико-механических свойств материала и условий напыления, прежде всего давления и температуры в контакте, скорости деформации.

Для очистки и активации используют механическое, химическое и термическое воздействие.

Механическое воздействие подразделяется на три вида:

- 1) обработку поверхности детали струей газа (обдув);
- 2) струей жидкости;
- 3) твердым материалом, который может быть компактным (резец, ролик) и дискретным (щеткой, зерна абразивного круга, частицы абразива).

Благодаря ряду особенностей, прежде всего высокой производительности и простоте аппаратного оформления при достигаемом качестве обработки, механические методы подготовки поверхности получили широкое распространение. Наиболее распространенные из них (нарезание рваной резьбы, струйно-абразивная обработка, иглофрезерование) связаны с ударным воздействием на материал основы и с образованием поверхности скола. Во всех случаях механического воздействия на основу является создание наклепа приповерхностных слоев и определенного рельефа поверхности.

Наиболее производительным и экономичным видом струйно-абразивной обработки поверхности металла является способ дробеструйной обработки [3].

В качестве абразивных материалов для дробеструйной обработки используют стальную и чугунную крошку (дробь), корунд, карбид кремния, кварцевый песок.

На процесс дробеструйной обработки влияет вид абразивного материала, форма, размеры, требования, предъявляемые к свойствам покрытий.

Стальная крошка должна быть твердой (7500 МПа), остроугольной, свободной от ржавчины.

Наилучшее качество поверхности получается при давлении сжатого воздуха 0,6 МПа.

Другим способом абразивной подготовки поверхности является очистка металлическими щетками, при которой снимается слой 0,5...2 мм и обеспечивается высокое качество поверхности с шероховатостью  $Ra$  10...50 мкм [4].

Удаление загрязнений, получение шероховатостей поверхности и ее нагрев до 200...300 °С достигается погружением детали в псевдосжиженный слой абразива [5].

При подготовке поверхности деталей типа тел вращения самым распространенным способом является нарезание рваной резьбы, которое обеспечивает повышенную прочность сцепления при сдвиге покрытия. Для этого используют резьбовой резец с углом при вершине 55...60°. Вершина угла должна иметь радиус закругления 0,3...0,5 мм, угол резания – 80°, передний угол резца равен 0° или отрицателен (2...5°). Резец устанавливают в резцедержателе с вылетом 100...150 мм. Для получения необходимой шероховатости режущую кромку смещают ниже оси детали. Вибрация резца вызывает дробление металла на обрабатываемой поверхности, что приводит к шероховатости. Рекомендуются следующие значения шага рваной резьбы: при диаметре детали до 20 мм – 0,5 мм, 25...50 мм – 0,8...1,0 мм, 60...100 мм – 1,5 мм [6]. Нельзя применять охлаждающие жидкости. Рваную резьбу нарезают за один проход.

При напылении покрытий необходимо обеспечивать равномерное заполнение углублений. Так, например, напыление порошка на пилообразную резьбу необходимо производить не перпендикулярно оси вала, а под острым углом. Кроме нарезки резьбы обработку поверхности можно производить насечкой вручную или с помощью пневматического зубила. Одним из способов подготовки поверхности, который не снижает усталостной прочности поверхности, является накатка.

При подготовке к напылению наружных гладких цилиндрических поверхностей незакаленных деталей из материала, твердость которого не превышает 35 HRC, часто применяют косую сетчатую накатку [6]. При такой обработке прочность сцепления напыленного покрытия с основным металлом при испытаниях на сдвиг резко возрастает, достигая 100 МПа.

Химическое воздействие осуществляют органические и неорганические (кислотные, щелочные, солевые) реагенты.

Химические способы подготовки поверхности позволяют получать необходимую шероховатость и устранять загрязнения поверхности детали [7].

При термическом воздействии используют нагретый газ (неподвижный и движущийся), ионизированный газ, лазерное излучение (инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый диапазоны).

Термическая подготовка газовыми разрядами и ионной бомбардировкой проводится в вакууме и позволяет очистить и активировать поверхность детали путем нагрева [8].

Подготовить деталь к нанесению защитного покрытия можно за счет предварительного напыления молибдена или композиции никель-алюминий. В результате этого получают тонкий подслои с шероховатой поверхностью, на которую напыляют материал с необходимыми эксплуатационными свойствами.

Подслои указанного состава повышают прочность сцепления защитных покрытий с основой и имеют обычно толщину около 0,05...0,13 мм.

Для исследований были выбраны композиции порошковых материалов, разработанные для упрочнения-восстановления опорных поверхностей прессовых валов (таблица).

Состав композиций для напыления

№ композиции	Состав композиции (в объемах)
1	ПТ-НА-01 (1/3) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (2/3)
2	ПТ-ЮНХ16СР2 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
3	ПТ-ЮНХ16СР2 (1/3) + ПГ-19М-01 (2/3)
4	ПТ-НА-01 (1/3) + ПГ-19М-01(2/5) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/3)
5	ПР-НД42СР(1/3) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф(1/3) + ПТ-НА-01 (1/3)
6	ПТ-19Н-01 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)

Для определения прочности сцепления применялся метод, основанный на непосредственном определении силы, направленной перпендикулярно к поверхности и отрывающей определенную площадь покрытия. Для этого были изготовлены специальные образцы и приспособление (рис. 1).

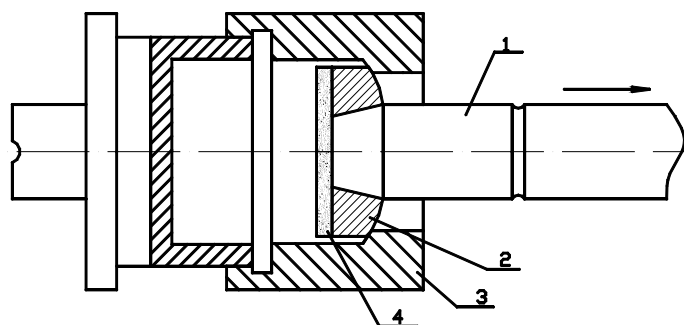


Рис. 1. Принципиальная схема испытания на отрыв:  
1 – конический штифт; 2 – кольцо; 3 – шарнирная опора; 4 – напыленный слой

Прочность сцепления покрытия с основанием определялась на пяти образцах с точностью измерения  $\pm 0,98$  Н. Для определения оценок и доверительных интервалов получаемых результатов использовались формулы, ГОСТ П.004-74.

Учитывая влияние на прочность сцепления окисных пленок, находящихся на поверхности напыления, особое внимание при проведении исследований уделялось соблюдению постоянного интервала времени между подготовкой поверхности и напылением, так как с течением времени не только увеличивается окисляемость основы, но и снижается наклеп поверхности, образованный при обдувке металлической дробью.

В качестве основного параметра шероховатости принята величина  $Ra$ , которая учитывает все точки профиля. Шаговая характеристика неровностей  $S$  также существенно влияет на эксплуатационные свойства [2, 3].

Дробеструйная обработка осуществлялась на дробеструйном аппарате мод. 44122, токарная – на станке 16К20 резцами Т15К6. Для дробеструйной обработки использовалась чугунная крошка HRC 62-64 с размером в продольном сечении  $l = 1,5...3$  мм, в поперечном –  $h = 0,5...1,5$  мм.

Шероховатость поверхности под напыление изучалась на профилометре – профиллографе мод. 252 с последующей обработкой профиллограмм.

Для определения прочности сцепления напыленных слоев различными композициями и установления зависимости прочности сцепления от шероховатости напыляемой поверхности было проведено предварительное группирование образцов по значениям  $Ra$ . Для этого стальные образцы подвергались дробеструйной обработке с различной выдержкой во времени и протачивались с различной подачей и скоростями резания. После этого измерялась шероховатость образцов, которые группировались по шероховатости  $Ra = \pm 5$  %. Группы с шероховатостью  $Ra = 30 \pm 5$  %,  $Ra = 40 \pm 5$  % и  $Ra = 50 \pm 5$  % мкм содержали по 5 образцов.

Напыление образцов осуществлялось на режимах, указанных в паспорте установки ТРУ-БПИ (дистанция напыления 0,17...0,2 м). После напыления и выдержки образцов около двух часов производились испытания.

Результаты испытания прочности сцепления в зависимости от шероховатости поверхности при дробеструйной обработке приведены на рисунке 2, а; прочности сдвига от шероховатости поверхности при лезвийной обработке – на рисунке 2, б.

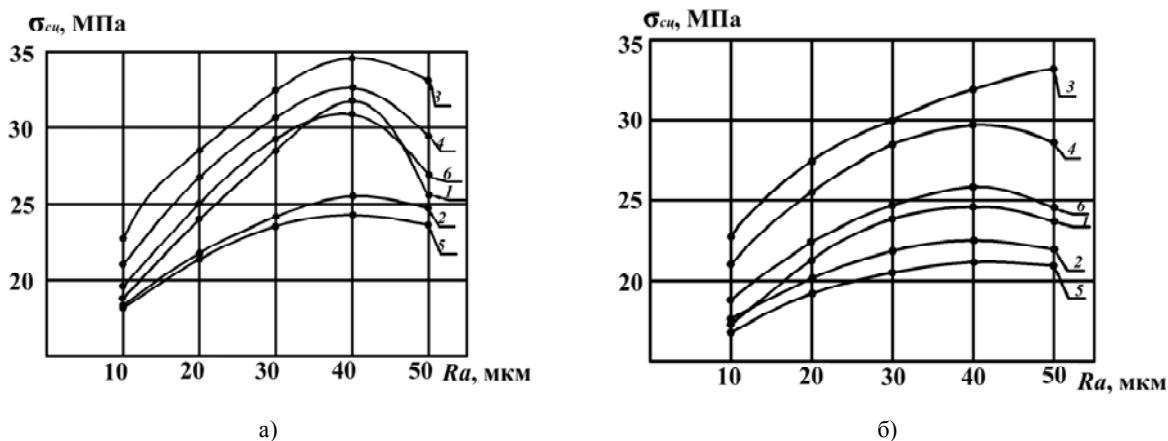


Рис. 2. Влияние шероховатости на прочность сцепления:  
а) – дробеструйная обработка; б) – лезвийная обработка;  
1 – композиция № 1; 2 – композиция № 2; 3 – композиция № 3;  
4 – композиция № 4; 5 – композиция № 5; 6 – композиция № 6

Анализируя результаты экспериментальных исследований, следует отметить, что шероховатость поверхности существенно влияет на прочность сцепления. Максимальная прочность сцепления для всех композиций обеспечивается при параметре шероховатости  $Ra = 40...45 \mu\text{m}$ . На прочность сцепления влияет также способ обеспечения оптимальной шероховатости. При той же шероховатости прочность сцепления больше у образцов, подвергнутых дробеструйной обработке. Очевидно, что при дробеструйной обработке кроме шероховатости на прочность сцепления оказывает влияние повышение общепотенциальной энергии поверхности (наклеп). В поверхностях, подвергнутых дробеструйной обработке, запас поглощенной энергии больше, чем при лезвийной.

На прочность сцепления оказывает большое влияние и состав композиций. Например, алюминиды повышают температуру частиц при напылении за счет экзотермической реакции, а, следовательно, повышают и прочность сцепления.

Параметры шероховатости исходной поверхности, обуславливающие максимальную прочность сцепления покрытия с основой (сталь 45), обеспечиваются следующими режимами обработки и геометрий режущего инструмента со вставкой из гексанида:

- скорость резания  $V = 90...100 \text{ м/мин}$ ;
- подача  $S = 0,4...0,55 \text{ мм/об}$ ;
- радиус при вершине резца  $R_\epsilon = 0,3...0,8 \text{ мм}$ ;
- глубина резания  $t = 0,4...0,7 \text{ мм}$ ;
- главный и вспомогательный углы в плане  $\phi = 40^\circ$ ;
- $\phi_1 = 20^\circ$ ,  $\gamma = 0...+2^\circ$ ;
- радиус округления режущей кромки  $\rho = 0,04...0,08 \text{ мм}$ .

Плазменное напыление производили на оптимальных режимах на установке УПУ-3Д. Дистанция напыления составляла 120 мм, толщина напыляемого слоя 1,5...2 мм. В качестве плазмообразующего газа использовали азот. Расстояние до обрабатываемой поверхности в процессе дробеструйной обработки составляло 0,5 м. Для оценки качества подготовки поверхности был введен коэффициент  $K$ , характеризующий энергетическое состояние поверхности при обработке дробью, который определяется по формуле:

$$K = \frac{60kQtv^2}{2S}, \text{ кг/с}^2,$$

где  $Q$  – производительность дробеструйного аппарата,  $\text{кг/ч}$ ;  $S$  – площадь обрабатываемой поверхности,  $\text{мм}^2$ ;  $t$  – время обработки, с;  $v$  – скорость дроби,  $\text{м/с}$ ;  $k$  – коэффициент использования дроби.

Зависимость прочности сцепления от коэффициента  $K$  представлена на рисунке 3.

Максимальная прочность сцепления достигается при  $K = 10 \cdot 10^4 \text{ кг/с}^2$ , что видно из рисунка 3.

Исследовалось и влияние интервала времени между подготовкой поверхности и напылением (рис. 4).

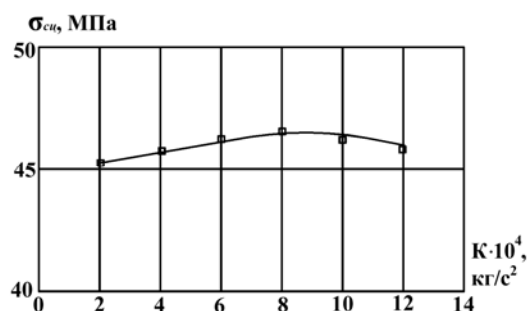


Рис. 3. Зависимость прочности сцепления от энергетического состояния поверхности

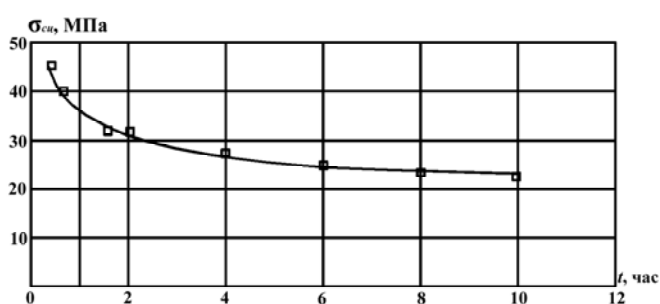


Рис. 4. Зависимость прочности сцепления от времени выдержки между операцией подготовки поверхности и напылением

В начальный период времени 0,5...1,5 часа наблюдается резкое уменьшение прочности сцепления, что, по-видимому, связано с изменением энергетического состояния поверхности. Через четыре часа прочность сцепления напыленного покрытия с основой с увеличением времени уменьшается плавно и определяется в основном созданной шероховатостью, а также окисными пленками, образовавшимися на поверхности. При выдержке времени свыше 10 часов, прочность сцепления снижается почти в два раза.

**Выводы.** Наибольшей прочностью сцепления обладают композиции № 3 и № 4, в состав которых входит медь, имеющая температуру плавления ниже, чем у железа и, следовательно, ее частицы прогреваются лучше. Кроме того, в состав этих композиций входят термореагирующие компоненты (Al, Ni), повышающие температуру частиц вследствие экзотермической реакции.

Также на прочность сцепления оказывает влияние энергетическое состояние поверхности. Наклеп поверхности при дробеструйной обработке увеличивает число активных центров схватывания, но до определенного значения – возникновение перенаклепа снижает количество активных центров.

Интервал времени между операцией подготовки поверхности и напылением необходимо сводить к минимуму, т.к. образующиеся окисные пленки на подготовленной поверхности препятствуют схватыванию частиц с основой, что снижает прочность сцепления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление и упрочнение деталей машин: обзорная информация. – М.: АгроНИИТЭИИТО, 1990. – 64 с.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
3. Ивашко, В.С. Электрохимическая технология нанесения защитных покрытий / В.С. Ивашко, И.Л. Куприянов, А.И. Шевцов. – Минск: Навука і тэхніка, 1996. – 375 с.
4. Пат. 0151969 (ГДР), 1981.
5. Пат. 52-25814 (Япония), 1977.
6. Сонин, В.И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении / В.И. Сонин. – М., 1973.
7. Гарбер, М.И. Прогрессивные методы подготовки поверхности / М.И. Гарбер // Журн. Всесоюзн. хим. об-ва. – 1980. – Т. 25, № 2. – С. 129 – 137.
8. Очистка поверхности изделий перед напылением газовыми разрядами / В.М. Таран [и др.] // Теория и практика газотермического нанесения покрытия. – Дмитров, 1983. – С. 52 – 56.

Поступила 15.08.2007